

反射面の表面形状に関する自動計測

栗原直希・菅原英直

群馬大学教育学部物理学研究室

(2006年9月13日受理)

Computer-Controlled Measurements on Profiles of Reflective Surfaces

Naoki KUWABARA and Hidenao SUGAWARA

Department of Physics, Faculty of Education, Gunma University

Maebashi 371-8510, Gunma, Japan

(Accepted September 13, 2006)

Abstract

A software for profile measurements on reflective surfaces was developed and applied to several surfaces which included two kinds of plane surface mirrors, a concave mirror and a paraboloid mirror. Experimental results showed that they were consistent with the descriptions for the radius of curvature and the slope error in the specification of each surface. It was found that the profilometer which was used here was able to determine surface roughness with accuracy below $1\mu\text{m}$.

1. 序 論

20世紀後半から、シンクロトロン放射（放射光）を光源とする研究が、理学、工学、医学など多岐の分野にわたって盛んに行われるようになってきている[1,2]。放射光は、X線から赤外線にわたる広範囲の連続波長を持った非常に強度の大きな電磁波である。放射光を使用するための光学系には、ミラーや回折格子、分光結晶等の様々な光学素子が使われ、それらの形状も使用目的に応じて、平面、球面、放物面等のようにいろいろなものがある。これらの光学素子の面精度や焦点距離の設計値からのずれは装置の性能に大きな影響を及ぼす。また、放射光は強度が大きく、この光を吸収することによって光学素子は発熱する。このような熱負荷はかなり大きいので、光学素子の熱変形を

評価することも必要である。さらに、放射光を使用するときは、光の通路が超高真空になっているので、その中に設置された光学素子の面形状を、実際に使用されているそのままの状態の評価できる測定法が必要である。以上のような観点から、放射光の光学系に用いる光学素子の面形状評価は重要であり、その評価法はより精度の高い表面研磨法や熱負荷に強い光学素子の開発と相俟って進んできた[3,4,5]。

そのような中で、放射光光学系に使われる光学素子の面形状を評価するために、レーザー光の反射を利用した面形状測定装置が開発された[6]。これは、被検面にレーザー光を入射させ、その入射位置を走査しながら反射光の角度変化を測定し、これによって表面形状を評価するものである。この装置を用いれば、光学素子などを実際の使用環境下に置きながら測定することができる。今までに、これを使って、放射光の照射によって熱負荷がかかけられている状態でのミラーの形状変化やトロイダルミラー断面の曲率半径等の評価がなされている[7,8]。しかし、これらの測定では、装置の駆動の自動化や表面形状の3次元表示、測定値から試料の焦点距離を導くデータ処理等はなされておらず、被検面上のある断面の形状だけが測定されていた。

本研究の目的は、コンピュータによってこの装置を制御し、被検面の3次元的な形状を算出するプログラムを開発し、その有用性を示すことである。具体的には、以下に列挙したような内容を含むプログラムを開発し、これを用いて、平面鏡、凹面鏡、放物面鏡の面形状を測定し、その結果を考察する。

- (1) 測定操作を自動化し、測定結果をコンピュータに取り込む。
- (2) 測定結果から被検面の形状を算出する。さらに、その面が球面、放物面であればその焦点距離を算出する。
- (3) 測定の結果得られた被検面の形状をコンピュータの画面上に3次元的に表示する。

2. 装置の動作原理

ここでは、レーザー光反射による表面形状測定装置の動作原理[6]について述べる。

局所的に微小な凹凸を持つ被検面に非常に細いレーザー光を入射し、レーザー光の入射位置を平行移動させた場合を考える。はじめのレーザー光入射位置での微小面の法線に比べて、レーザー光をある距離移動した後の微小面の法線が角度 α だけ傾いていたとすると、入射角、反射角は法線の傾き α により変化する。このため、入射光と反射光の間の角度もレーザー光の移動前後で変化する。レーザー光の移動による入射光と反射光の間の角度の変化量 $\Delta\theta$ と α との関係は、

$$\alpha = \frac{\Delta\theta}{2} \quad (2.1)$$

である。ここで、 α は移動前にレーザー光が入射していた微小面に対する移動後にレーザー光が入

射している微小面の傾き角に等しい。レーザー光入射位置を平行移動させながら反射光の角度変化 $\Delta\theta$ を各レーザー光入射位置に関して順次測定していけば、被検面全体の傾きの分布を知ることができる。

被検面上側にレーザー光の移動方向に平行な X - Y 平面を仮定する。この X - Y 平面はレーザー光と一体となって被検面に対して平行移動するものとする。 $\Delta\theta$ は X - Y 平面への反射光入射位置の変化 ΔS から求める。移動前後のレーザー光、被検面および X - Y 平面の関係を図 1 に示す。 S から発したレーザー光は被検面上の点 O で反射し、 X - Y 平面上の点 P に達する。 L は被検面と X - Y 平面との間の距離である。次に、レーザー光入射位置と X - Y 平面を Δx だけ平行移動させる。 S' は移動後の光源、 O' は移動後のレーザー光入射位置である。図の右側の点線 $O'P$ は移動前の反射光の光路を平行移動したものである。 S' から発したレーザー光は被検面上の点 O' で反射し、 X - Y 平面上の点 Q に達する。 O' と X - Y 平面との間の距離は被検面の凹凸が微小なことから、 L と考

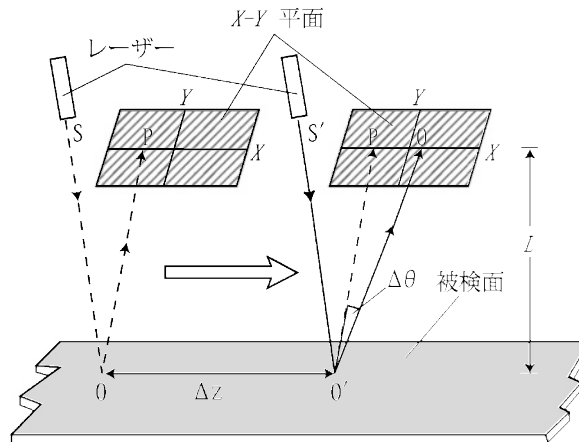


図 1 レーザー光移動前後の関係

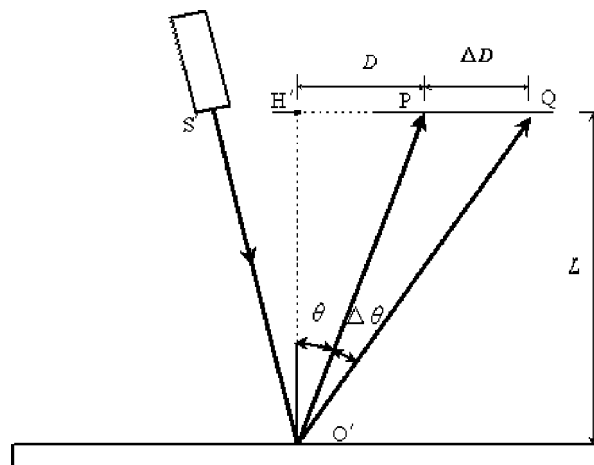


図 2 レーザー光反射角度と X - Y 平面の関係

えられる。 $O'P$ と $O'Q$ のなす角が (2.1) の $\Delta\theta$ である。図 1 の右側 (移動後) の部分を正面から見たものを図 2 に示す。ここで、 $O'H'$ を O' から $X-Y$ 平面に下ろした垂線とし、 $\angle H'O'P$ を θ とする。

図 2 より、

$$\tan(\theta + \Delta\theta) = \frac{\tan\theta + \tan\Delta\theta}{1 - \tan\theta \tan\Delta\theta} = \frac{D + \Delta D}{L} \quad (2.2)$$

が成り立ち、これより次式を得る。

$$\tan\Delta\theta = \frac{\Delta D}{L} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{D^2}{L^2} + \frac{D \cdot \Delta D}{L^2} \right)} \right)$$

L 、 D および ΔD の値は、本研究では、実験ごとに多少変わるが、概ね $L \div 1400\text{mm}$ 、 $D \div 50\text{mm}$ 、 $\Delta D \leq 5\text{mm}$ である。

これより、

$$\tan\Delta\theta \cong \frac{\Delta D}{L}$$

従って、

$$\Delta\theta \cong \frac{\Delta D}{L} \quad (2.3)$$

である。これを (2.1) に代入すれば、

$$\alpha = \frac{\Delta D}{2L} \quad (2.4)$$

が得られる。このように、 ΔD に対して充分大きな L を仮定すれば、簡単に α が求められる。

最初に被検面で反射したレーザー光の $X-Y$ 平面上の位置 P と、レーザー光を移動したときの反射光の $X-Y$ 平面上の位置との差を順次求めて、上の式の ΔD に代入していけば、最初にレーザー光が入射した微小面を基準にした被検面上の傾きの分布を知ることができる。

次に、被検面上のレーザー光入射位置を (x, y) で表し、基準面 ($x-y$ 平面) からの高さを $z(x, y)$ とする。 $z(x, y)$ は被検面の面形状そのものを表す。(2.4) で得られた各測定点での傾きを積分すれば、面形状 $z(x, y)$ を求めることができる。 $X-Y$ 平面上での X 方向、 Y 方向への反射光位置変化をそれぞれ (2.4) の ΔD に代入して求めた傾き角を $\alpha_x(x, y)$ 、 $\alpha_y(x, y)$ とすると、

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = \alpha_x(x, y) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = \alpha_y(x, y) \quad (2.6)$$

一方、 $z(x, y)$ の全微分は、

$$dz = \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} dx + \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} dy \quad (2.7)$$

で与えられる。これは、(2.5)、(2.6)、(2.7) より、

$$dz = \alpha_x(x, y) dx + \alpha_y(x, y) dy \quad (2.8)$$

と書き換えることができる。

(2.8) の $\alpha_x(x, y)$ 、 $\alpha_y(x, y)$ は上述の測定の結果、(2.4) から得られる値である。従って、(2.8) に測定結果を代入し、これを積分すれば面形状 $z(x, y)$ を求めることができる。一定の厚さ分は傾きが 0 であるから測定にかからない。これは (2.8) を積分したとき、厚さ $z(x, y)$ が積分定数の分だけ不定であることに対応している。

3. 実験装置

上で説明した測定原理を用いて面形状の測定を実現するためには、レーザー光入射位置を自由に移動し、かつ、被検面で反射したレーザー光の反射位置変化を検出する必要がある。本装置[8]は、レーザー光入射位置の移動を 2 台のパルスステージの上下左右動で実現している。また、被検面で反射したレーザー光の反射位置を検出するためにポジションセンサを用いている。

ポジションセンサとしては、浜松ホトニクス株式会社の C2399-01 を使用した。ポジションセンサの受光面は 10mm×10mm で、位置検出誤差は±2.0%、光量変化による誤差は±1%、ドリフトは±0.5%である。また、入射位置として検出される位置座標は、受光面へ入射した光量の重心の位置として与えられ、位置座標 x 、 y に対応する 2 つの電圧値として出力される。受光面の前には干渉フィルターと ND フィルターを設置し、センサが正常に機能する範囲の光量が入射するように調整した。

パルスステージには水平方向移動用に株式会社オプテックの PS100-100X が、垂直方向移動用に PS100-60Z が使用されている。それぞれのパルスステージは同社のパルスモータコントローラ PD-630 によって直接操作できる。また、このパルスモータコントローラには GP-IB が備えられており、これを使って外部からコンピュータによって制御することができる。ステージの最大移動量は水平方向 100mm、垂直方向 60mm である。また、水平、垂直方向共に位置決め精度は 0.010mm である。

実験装置の概要を図 3 に示す。(a) は上面図、(b) は正面図である。図 3 において、 X は水平方向駆動用のパルスステージ、 Y は垂直方向移動用のパルスステージ、 L はレーザー光源、 D はポジションセンサの検出器である。 L から発したレーザー光は被検面上で反射される。そして、その反射

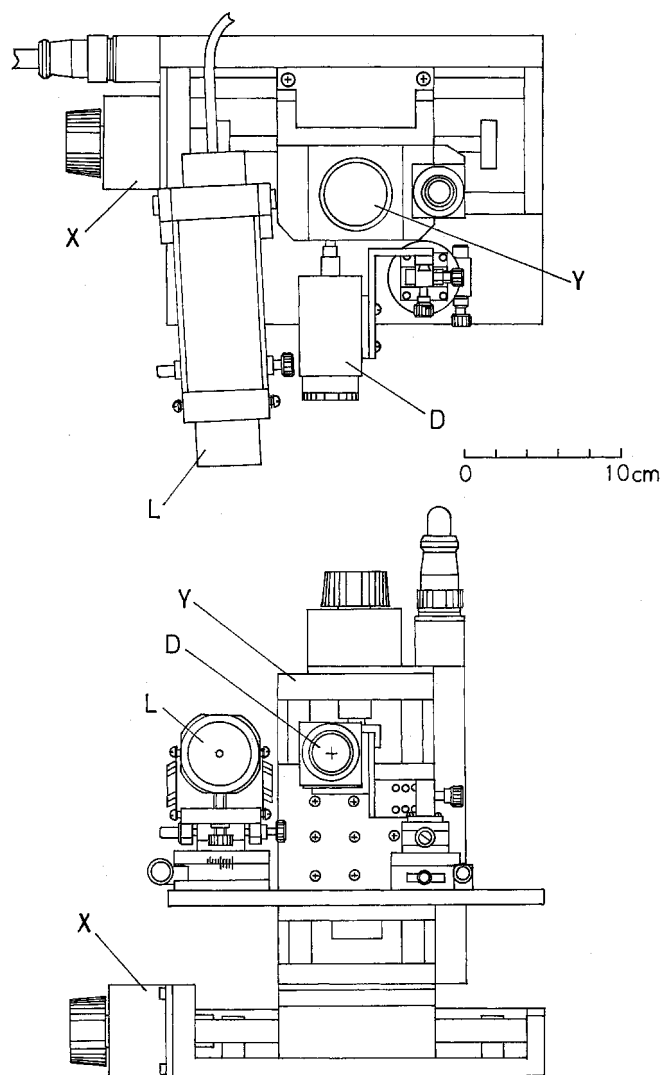


図3 実験装置の概要

光の位置は D で検出される。パルスステージの移動やレーザー光反射位置の測定は GP-IB インターフェイスを介して、コンピュータで制御した。制御系の系統図を図 4 に示した。

4. プログラムの開発

ここでは開発したパーソナルコンピュータ用プログラムについて述べる。プログラム言語としては Microsoft の Visual Basic Ver.6.0 を使用した。また、各測定機器とコンピュータ間の通信には GP-IB インターフェイスを用いた。開発したプログラムは、大きく測定部と算出・表示部に分けられる。

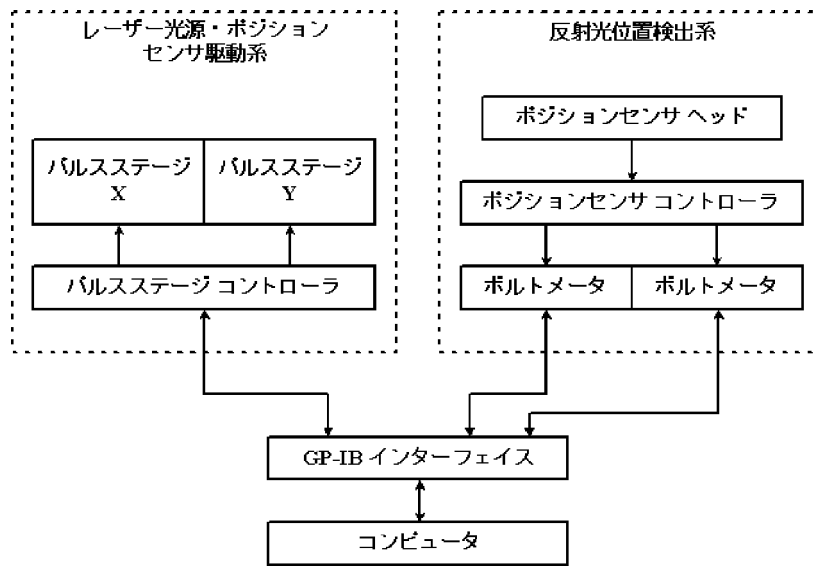


図4 制御系の系統図

測定部は、測定手順を自動化し、測定データをコンピュータ内に保存する役割を持つ。図5にそのフローチャートを示す。

測定結果として保存されたデータから各点の傾きや面形状を計算するのが算出部である。算出部では、測定された被検面反射光位置の変化を(2.4)に代入し、X方向、Y方向それぞれの面の傾きを計算する。面形状 $z(x, y)$ を計算するには、得られた測定結果を(2.8)に代入し積分を実行すればよい。本プログラムの開発では、断面形状を2次元のグラフで表現するだけでなく、面形状の3次元表示も行えるようにした[9]。さらに、被検面を球面と仮定したときの曲率半径や、放物面と仮定したときの焦点距離を求めることもできるようにした。

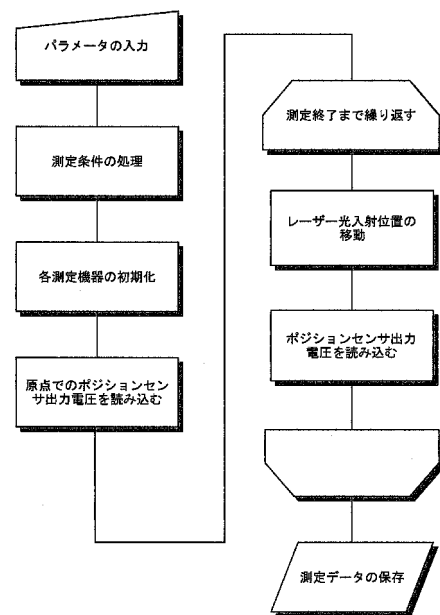


図5 測定手順のフローチャート

5. 実験

作成したプログラムを用いて、平面鏡、凹面鏡、放物面鏡の面形状を測定した。以下に、その具

体的な実験内容を示す。

平面鏡に関しては、35mm×109mm の長方形で、面精度が 4～6 波長(カタログ公称値)の平面ミラーと、外径 25.4mm の円形で面精度が 1/10 波長 (カタログ公称値) のオプティカルフラットを用いた。前者の平面ミラーについては面上 30mm×30mm の範囲を測定した。

凹面鏡に関しては、外径が 50.8mm の円形で面精度 1/4 波長のものを使用した。焦点距離は 1016.0mm で、その公差は± 2 %とされている。凹面鏡は、面の傾きの変化が大きく、レーザー光を平行移動したときの鏡面上の入射位置のわずかな変化によって反射光が 10mm×10mm の受光面から外れてしまうので、広範囲を測定することはできない。本研究では、凹面鏡の中心付近に 5mm×5mm の範囲を設定し、その面形状を測定した。また、得られた結果からその焦点距離を算出することも行った。

放物面鏡に関しては、外径が 152.4mm の円形で面精度が 1/8 波長のものを使用した。焦点距離は 914.4mm で、その公差は± 1 %とされている。放物面鏡についても、凹面鏡と同じく、本装置は広範囲の測定はできないので、放物面の中心付近に 3mm×3mm の範囲を設定して、その面形状を測定した。また、得られた結果からその焦点距離の計算も行った。

表 1 にそれぞれの試料に対する測定条件を示した。

表 1 各試料の測定条件

	4～6 波長 平面ミラー	1/10 波長オプティ カルフラット	凹 面 鏡	放物面鏡
被検面と受光面との 距離 [m]	1.366	1.409	1.397	1.351
X 方向の総移動量 [mm]	30.00	15.00	5.00	3.00
X 方向の測定データ数	31	31	21	21
Y 方向の総移動量 [mm]	30.00	15.00	5.00	3.00
Y 方向の測定データ数	31	31	21	21

6. 結果および考察

本研究で開発したデータ解析プログラムを用いて、4 種類のミラーについて表面形状測定を行った。ここでは、それぞれの実験の結果について考察する。以下で示されるそれぞれの試料の 3 次元的面形状の図は本プログラムによる出力画面と同等のものである。これらは、x-y-z 座標上に、原

点を含む微小平面（原点での接平面）を基準にした各測定点（ x, y ）での面の高さ z をプロットしたものである。 x, y, z 軸の単位は測定の結果得られた面形状に合わせて適宜設定した。

§ 1. 平面鏡の測定

4～6 波長平面ミラーと 1/10 波長オプティカルフラットに対して、それぞれ同じ範囲を 5 回測定した。図 6、図 7 に、5 回測定の中から、ある 1 回の測定の結果得られた 4～6 波長平面ミラーと 1/10 波長オプティカルフラットの面形状を示した。

図 6 では、面形状は x 方向に幅広い凸形になっている。図 7 のオプティカルフラットの面形状は、図 6 と比べると、全体が傾いてはいるもののかなり平らである。

測定の結果得られた面形状の 5 回測定の実値およびその標準偏差を求めた。面全体での標準偏差の最大値は、4～6 波長平面ミラーでは $0.20\mu\text{m}$ 、1/10 波長オプティカルフラットでは $0.06\mu\text{m}$ である。5 回の測定データを比較すると、面形状の細かな構造はそれぞれほとんど一致して見えるが、面全体の傾きが各データで異なっており、標準偏差は原点から遠い測定点ほど大きくなる。この原因は、それぞれの試料の 5 回測定の間で原点位置が微妙にずれていることにあると考えた。従って、各

測定データの間で原点（レーザー光を最初に入射した点）の位置が微妙にずれると、その基準となる平面の傾きが変化し、得られる面形状全体が傾くことになる。そして、結果的に、原点から遠い測定点ほど各測定データ間で高さに差が出てきて、標準偏差が大きくなってしまふのである。以上

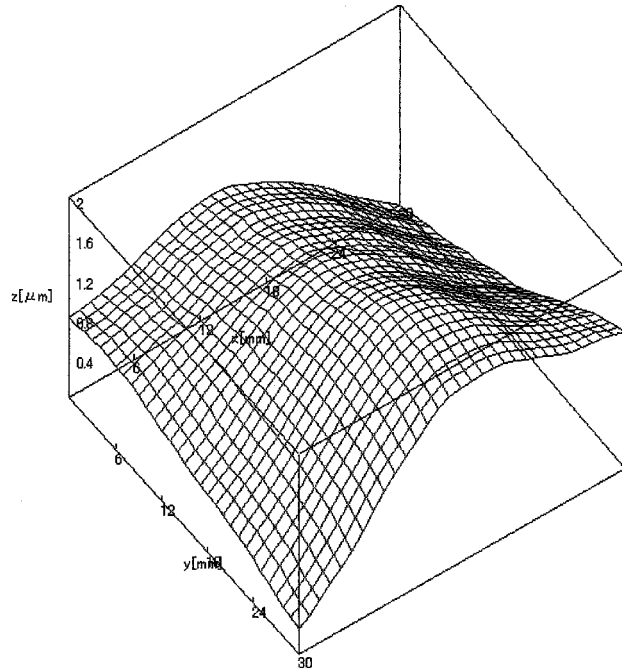


図 6 4～6 波長平面ミラーの面形状

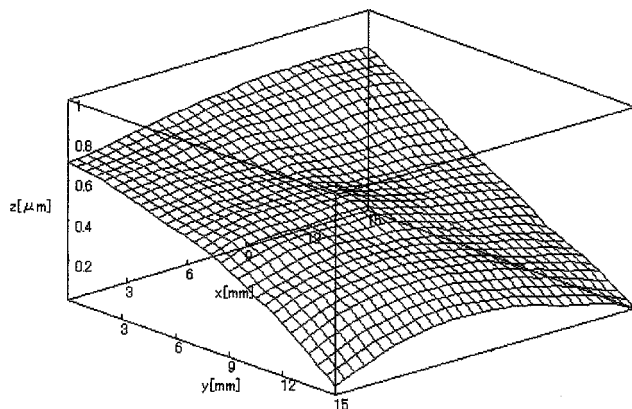


図 7 オプティカルフラット面形状

のような考えから、各測定によって得られた面形状の四隅のうちいずれか3点を含むような平面の傾きを面全体の傾きとして、得られた面形状から面全体の傾きを補正すれば、精度の良い面形状を得ることができるはずである。図6、図7に示した測定結果から面全体の傾きを補正し、その結果を図8、図9に示した。

次に、平面鏡の面精度を評価する。面精度とは、理想的な面と試料面との差の最大値である。本研究で用いた平面ミラーの面精度のカタログ公称値は $\pm 4 \sim 6$ 波長、オプティカルフラットの面精度のカタログ公称値は $\pm 1/10$ 波長である。この場合の1波長は $0.6328\mu\text{m}$ (HeNe レーザ発振波長) であるから、基準面と被検面との間隔は、 $4 \sim 6$ 波長平面ミラーでは $5.0\mu\text{m}$ から $7.6\mu\text{m}$ 以下、 $1/10$ 波長オプティカルフラットでは $0.13\mu\text{m}$ 以下になることが保証されている。

図8、図9に示した形状は、図6、図7に示した面形状の四隅の内3点を含むような平面との差なので、3点を含むような平面を被検面に重ねた時にできる間隔を表している。従って、図8、図9の高低差を求めることによって、図6、図7に示した面形状の面精度を評価することができる。図8と図9において、最高点と

最低点との高さの差はそれぞれ $2.8\mu\text{m}$ と $0.34\mu\text{m}$ であった。従って、測定の結果得られた $4 \sim 6$ 波長平面ミラー上の $30 \times 30\text{mm}$ 範囲の高低差は面精度の公称値 $\pm 4 \sim 6$ 波長の範囲に収まっており、

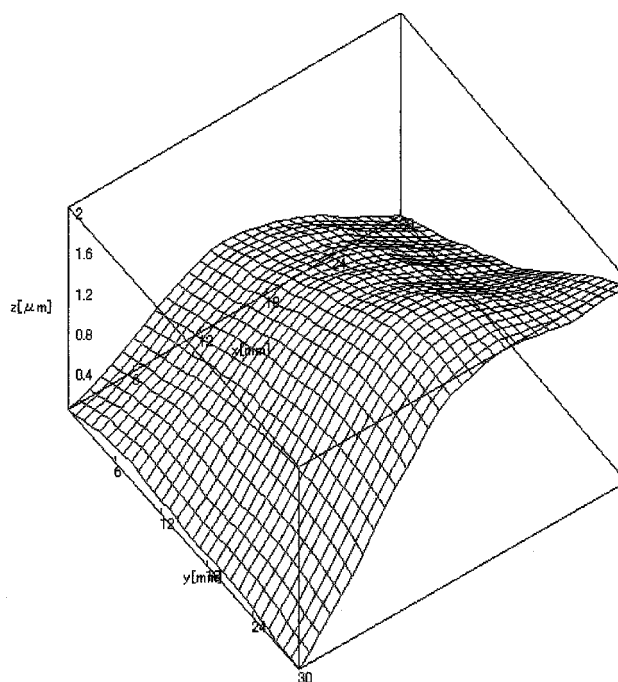


図8 基準面と平面ミラーとの形状差

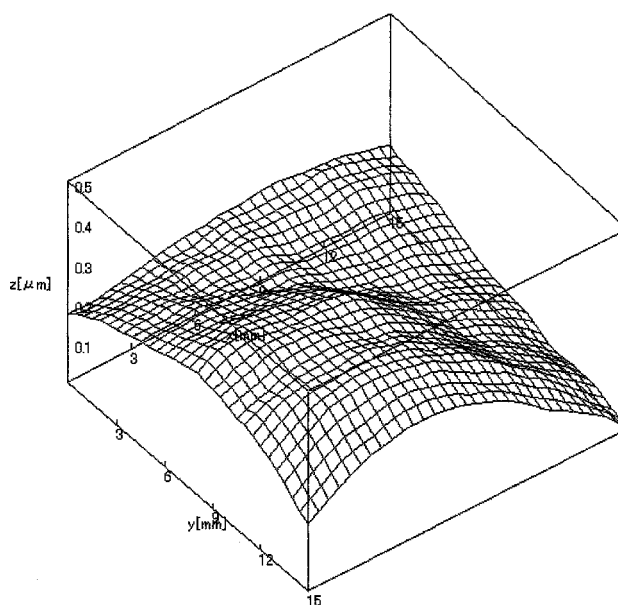


図9 基準面とオプティカルフラットとの形状差

本測定と試料のカタログ公称値は矛盾していない。測定の結果得られたオプティカルフラットの高低差は試料の公称値 $\pm 1/10$ 波長よりも大きい。しかし、測定された $1/10$ 波長オプティカルフラットの高低差は4～6波長平面ミラーに比べてかなり小さく、比較的高精度な平面になっていることが検証された。

オプティカルフラットの場合に得られた面精度 $\pm 0.17\mu\text{m}$ は、本研究で用いた表面形状測定装置の測定限界を示していると言えるかもしれない。

§ 2. 凹面鏡の測定

凹面鏡上の同じ範囲に対して5回の測定を行い、そのうちの1回の結果を図10に示した。

5回の測定結果から各測定点での面形状の標準偏差を求めた。面全体でのその値の最大値は $0.02\mu\text{m}$ となった。これは、平面鏡測定における本装置の標準偏差とほぼ一致する。

次に、5回の測定結果からその範囲の焦点距離を計算したところ、平均値は 1063mm となった。このとき、標準偏差は 2mm である。従って、得られた焦点距離の4桁程度は信頼できる値であると考えられる。試料の焦点距離の公称値はその公差を考慮すると、 $1016.0 \pm 20\text{mm}$ である。従って、測定値は試料の公称値よりも若干大きな値になっている。この原因として、本研究では試料上の一部の面形状から焦点距離を計算しており、試料面において局所的な曲率半径のバラツキがあることが考えられる。

次に試料の面精度を評価する。平面鏡の面精度では平面と被検面との形状差を考えたが、凹面鏡の面精度では理想的な凹面を基準面として、基準面と被検面との形状差を考える。被検面の面精度を評価するために、測定結果から求めた曲率半径を用いて理想的な凹面形状を計算し、その理想的な凹面を基準面として、基準面と被検面との形状の差を求めた。これは被検面が理想的な凹面からどの程度ずれているかを表している。試料の面精度の公称値は $1/4$ 波長である。波長を $0.6328\mu\text{m}$ とすると、面精度は $\pm 0.16\mu\text{m}$ となり、凹面鏡全体に曲率半径 2032mm (焦点距離 $\times 2$)の凹面を重ねた場合の形状差はこの値以下になることが保証されている。

さらに、図10と同じ範囲をもう一度測定した。それら2回の測定によって得られた面形状とそれ

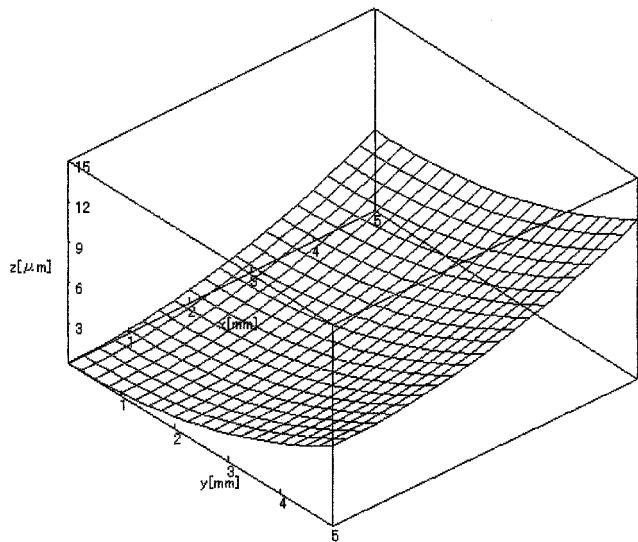


図10 凹面鏡の面形状

らから求めた理想面との差をそれぞれ図 11、図 12 に示した。また、それぞれの測定した面形状から得た曲率半径は 2126mm、2130mm である。図 11 と図 12 を比較すると、ほとんど同じ形状が再現されていることがわかる。従って、このような計算の結果得られた形状は、測定による誤差ではなく、被検面に固有の構造であると考えることができる。

図 11 において、計算の結果得られた高低差は $0.17\mu\text{m}$ となっており、これは試料の公称値 $\pm 1/4$ 波長内に収まっている。ただし、これは本研究で測定した凹面鏡の中心付近 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の範囲内で、基準面の曲率半径を 2128mm とした場合である。

§ 3. 放物面鏡の測定

試料として用いた放物面鏡上の同じ範囲に対して 5 回の測定を行った。そのうちの 1 つの測定結果を図 13 に示した。

次に、5 回の測定によって得られた面形状の標準偏差を求めた。その値の面全体での最大値は $0.003\mu\text{m}$ となった。

被検面上の同じ部分を 5 回測定し、その焦点距離の平均値を計算すると 932mm となった。標準偏差は 1mm である。よって、測定の結果得られた焦点距離は 3 桁程度までが信頼できる値である。試料の公称値はその公差を考慮すると、 $914.4 \pm 9.1\text{mm}$ である。従って、測定の結果得られた焦点距離は試料の公称値よりやや大きい。これは、前述の凹面鏡と同じく、放物面鏡の焦点距離の局所的なバラツキに影響されているのかもしれない。

次に、放物面鏡の面精度を評価する。放物面の面精度は、基準面を理想的な放物面として、基準

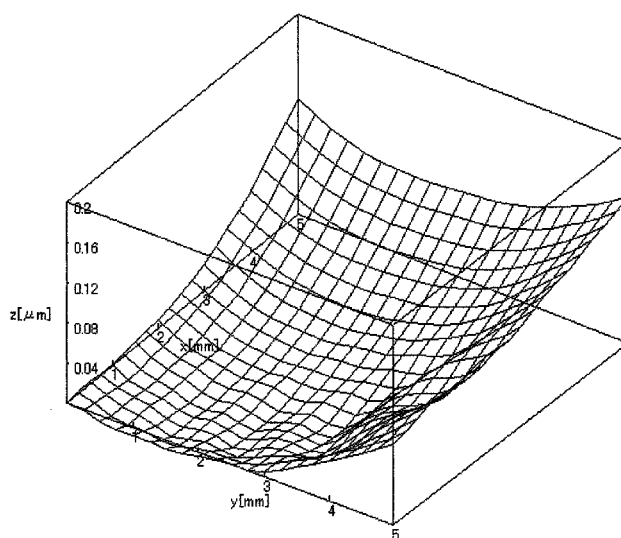


図11 理想的な凹面と被検面との形状差(1)

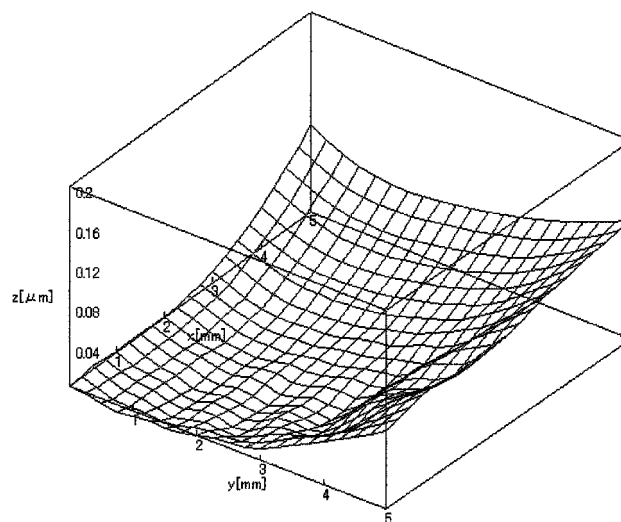


図12 理想的な凹面と被検面との形状差(2)

面と被検面との形状差の最大値を示したものである。測定の結果得られた面形状の面精度を考えるために、まず、測定された面形状から焦点距離を算出し、その焦点距離を用いて計算した放物面を基準面と仮定する。そして、基準面と測定の結果得られた面形状の差を求め、被検面の面精度を考える。試料の面精度の公称値は $1/8$ 波長である。波長を $0.6328\mu\text{m}$ とすると、面精度は $\pm 0.08\mu\text{m}$ となる。図 14 に、測定の結果得られた面形状とその結果から求めた焦点距離を用いて仮定した基準面との差を示した。図 14 において、最高点と最低点との差は $0.04\mu\text{m}$ である。従って、被検面の高低差は面精度の公称値内に収まっていることがわかる。ただし、これは本研究で測定した放物面鏡の中心付近 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ の範囲内で、 927mm の焦点距離を持った放物面を基準面と仮定した場合の面精度である。

§ 4. 各ミラーの公称値と実験値の比較

本研究で測定に用いた平面鏡、凹面鏡および放物面鏡について、面精度等のカタログ公称値と実験値を以下に比較する。

本研究によって得られたそれぞれの試料に関する測定結果を表 2 に示した。ここに示した焦点距離および面精度の実験値は、いずれも 5 回の測定の平均値である。焦点距離の公称値の誤差はその公差を、実験値の誤差はその標準偏差を表している。また、面形状の標準偏差は、5 回測定においてそれぞれの面全体の標準偏差を求めたものの中で、最大となる点の値を示した。

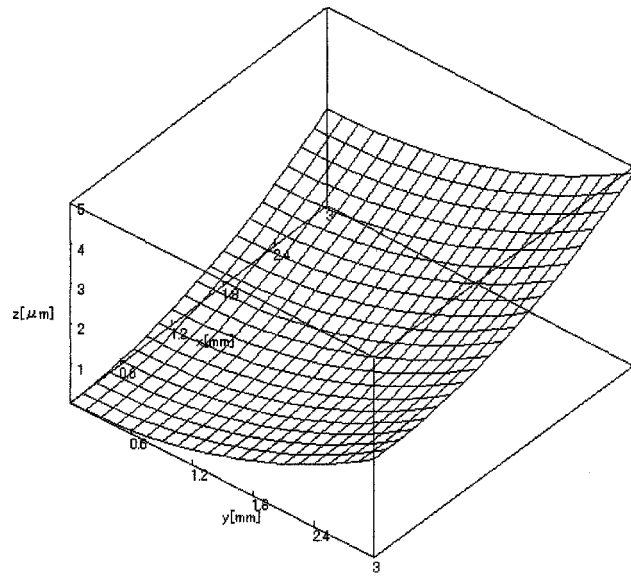


図13 放物面鏡の面形状

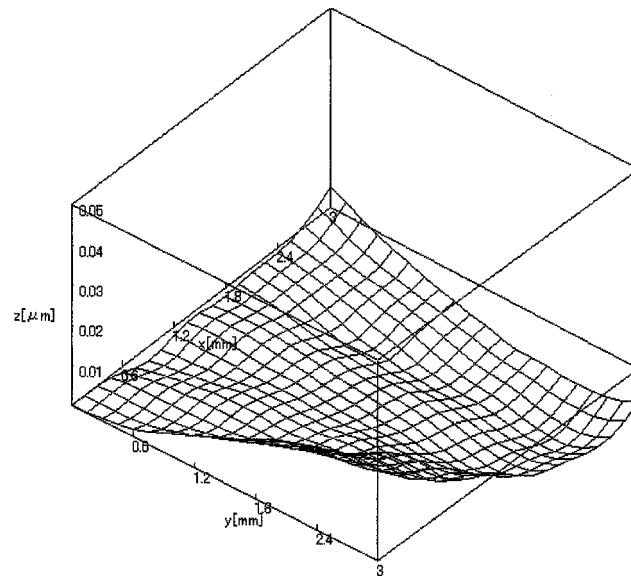


図14 基準面と被検面との差

表2 各ミラーの公称値と実験値の比較

	測定領域 [mm]	分割数		焦点距離 [mm]		面精度 [μm]		面形状の 標準偏差 [μm]
		x	y	公称値	実験値	公称値	実験値	
4～6波長平面ミラー	30×30	30	30	—	—	$\pm 2.5 \sim 3.8$	± 1.4	0.11
1/10波長オプティカルフラット	15×15	30	30	—	—	± 0.07	± 0.17	0.04
1/4波長凹面鏡	5×5	20	20	1016 ± 20	1063 ± 2	± 0.16	± 0.08	0.02
1/8波長放物面鏡	3×3	20	20	914.4 ± 9.1	932 ± 1	± 0.08	± 0.02	0.003

1/10波長オプティカルフラットの面精度の実験値は公称値より2倍程度大きくなっている。この差は、カタログ公称値を測定した場合と本研究とでは実験方法が異なるので、実験方法の相違によるものかもしれない。また、本研究では、実験装置や試料を通常の実験台の上に固定しており、特別な除振対策を講じていない。特に本研究で用いた装置の駆動用モーターは連続駆動ではなく、パルスによる駆動であるため、1パルスの駆動ごとに反発力が生じるので、振動が起こる。この振動がレーザー光反射位置に誤差を生じさせ、測定結果に影響を与えている可能性がある。

面全体の標準偏差は1/10波長オプティカルフラットや4～6波長平面ミラーの方が凹面鏡、放物面鏡よりも大きな値になっている。原因として考えられるのは、本研究で使用したポジションセンサにおいて、受光面に入射したスポット光の位置決め精度は $\pm 0.01\text{mm}$ であるので、得られる測定データの相対誤差が面全体での傾きの変化が小さいオプティカルフラットのような平面を測定するときほど大きくなることである。これに対して、凹面鏡や放物面鏡では、表面の曲率のため、入射光の位置を変えたとき、反射光のポジションセンサ受光面上での位置の変化量が大きく、位置決めの相対誤差は平面に対してかなり小さくなる。以上のような誤差のため、平面ミラーやオプティカルフラットの方が放物面鏡、凹面鏡の測定結果よりも面形状の標準偏差が大きくなっていると考えられる。

他の測定結果については、公称値と矛盾しない値が得られた。

以上のことから、本研究で新しく開発した表面形状測定装置のためのコンピュータ制御プログラムは正常に機能していることが結論づけられる。表面形状の測定が自動的に行われ、被検面の表面形状がディスプレイ上に3次元的に表示されるとともに、曲率半径等の値も容易に知ることができる。

参 考 文 献

1. H. Winick and S. Doniach, “*Synchrotron Radiation Research*” (Plenum Press, New York, 1980).
2. E. Eastman and Y. Farge, “*Handbook on Synchrotron Radiation*” (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1982).
3. T. Kinoshita *et al.*, Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research A, **467-468** (2001) 329.
4. T. Ishikawa, Y. Mori and K. Endo, Japan. Soc. Synchrotron Radiation Research, **17** (2004) 3.
5. Y. Mori, K. Yamamura and Y. Sato, Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 4620.
6. H. Sugawara, M. Yanagihara, S. Asaoka and H. Maezawa, Japan. Soc. Synchrotron Radiation Research, **9** (1996) 335.
7. H. Sugawara, M. Yanagihara, S. Asaoka, M. Okusawa and H. Maezawa, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **80** (1996) 485.
8. E. Ishiguro, H. Sugawara, M. Okuyama, N. Waku, S. Sato and T. Takigawa, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **80** (1996) 489.
9. 森正 武 「曲線と曲面－計算機による作図と追跡」(教育出版株式会社, 1974)。